风电齿轮箱小齿轮齿面剥落原因分析

姜荣国[1] 王 强[2] 李若辉[1] 付长明[2] 张国辉[1] 张海超[1]

1. 辽宁大唐国际新能源有限公司 沈阳 110001;
2. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家 (联合) 实验室 沈阳 110016

摘要: 某风场1.5 MW风电机组齿轮箱中速轴小齿轮失效。该齿轮箱设计寿命20 a，实际使用了5 a。齿轮的材质是20CrNiMo，齿面经过渗碳淬火。采用宏观观察、微观观察和断口分析并结合其它理化测试，分析了小齿轮失效的原因。现场宏观观察发现，大部分轮齿相对完好，只有两支轮齿失效，其中一支齿面剥落，另一支齿面硬化层开裂。经分析，齿面剥落和齿面开裂的原因相同。导致齿轮失效的原因是：齿面粗糙度较大，较深的加工刀痕在异常冲击载荷的作用下造成齿面开裂，随后在循环工作载荷的作用下，萌生了疲劳裂纹并不断扩展，最终导致齿面硬化层脱落。建议提高齿轮表面加工质量，降低表面粗糙度，同时改进齿轮箱制动技术，避免异常载荷冲击造成齿面过载。

关键词: 风电 齿轮箱 齿轮 剥落 失效分析 裂纹

中图分类号: TK83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6495(2016)02-0154-06

Failure Analysis of Flakes Fell from Small Gear Surface in Wind Power Gearbox

JIANG Rongguo[1], WANG Qiang[2], LI Ruohui[1], FU Changming[2], ZHANG Guohui[1], ZHANG Haichao[1]

1. Liaoning Datang International Renewable Power limited Company, Shenyang 110001, China;
2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang National Laboratory for Materials Science, Shenyang 110016, China

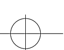
Abstract: Flakes fell from the tooth surface of the small gear in the gearbox of a 1.5 MW wind turbine in service. The design lifetime of the gear is 20 a. However, it failed 5 a later since it was installed into the gearbox. The material is 20CrNiMo and the gear was carburized and quenched during the manufacturing process. Macro- and micro-observation of the fracture surface as well as some necessary physical and chemical analysis were applied to analyze the cause for the failure of the small gear. Besides, results from the macro-observation showed that only two teeth failed, on the one of which flakes fell from the tooth surface only left some pits, and on the other tooth surface some cracks can be observed obviously. The results also showed that pits and cracks could be attributed to the same reason. Tool marks on the tooth surface increases the risk of cracking. In addition, the abnormal load introduced by emergency braking led to cracks occurred along the machining marks on the tooth surface. Then, fatigue cracks nucleated at the tip of the crack and extend slowly driven by the working load. Finally, the hardened layer fell from the tooth surface and left some pits. It was suggested that the machining quality and the braking technology should be improved in order to avoid the cracking of the teeth surface under the abnormal impact load.

定稿日期: 2015-05-14

作者简介: 姜荣国，男，1966年生，硕士，高级工程师

通讯作者: 王强，E-mail: gmwang@imr.ac.cn，研究方向为金属构件失效分析与预防/铝及铝合金导体材料高强高导基础理论

DOI: 10.11903/1002.6495.2015.144



Key words: wind power, gearbox, gear, peel off, failure analysis, surface crack

1 前言

风能是一种可再生的清洁能源,合理利用风能不但有很好的经济效益,同时还能保护环境,实现可持续发展[1-3]。据报道,2007年底我国风电装机容量位居全球第五,累计装机容量已达5906 MW,大量风电机组投产给社会提供了源源不断的电力能源,但同时也给风电管理提出了难题,经过一段时间的工作以后,风电齿轮箱频繁发生失效,给风电生产企业造成了很大的经济损失[4-6]。

在风电齿轮箱中,齿轮是最重要的传动部件,常用的有直齿轮圆柱齿轮和斜齿轮。近年来,关于齿轮失效的报道也很多,齿轮最常见的失效形式有齿面磨损、胶合、接触疲劳、塑性变形以及轮齿折断等[7-11]。其中,齿面硬化层剥落最多,这种破坏形式产生的原因也很多,其可能原因有过载、偏载、接触疲劳等。

风电的快速发展也促进了我国风电装备制造业的快速发展。虽然汲取了国外的先进设计和制造经验,但是消化和发展这些技术仍需要时间和考验,风电机组工作环境恶劣,载荷也非常复杂,因此风电机组中的齿轮、轴承等核心部件的失效问题越来越引起重视[12]。积极开展风电齿轮箱齿轮失效分析,有利于找出齿轮破坏的真正原因,更重要的是可以促进生产企业改进齿轮设计、生产和装配技术以及管理水平,提高我们风电齿轮箱的制造技术,最终延长产品的使役寿命,减少损失,造福于整个社会。

某1.5MW风电机组齿轮箱内中速轴小齿轮使用5 a后齿面出现剥落坑和裂纹,该齿轮的设计寿命是20 a。现场拆解后发现中速轴小齿轮有两支轮齿失效,一支轮齿表面局部有剥落坑,另一支轮齿有齿面裂纹。本文通过宏观观察、微观观察、痕迹分析、成分分析、硬度测试、粗糙度测试,并结合齿轮的工况,分析出齿轮失效的根本原因是齿面粗糙度略高,受到异常的冲击载荷导致硬化层开裂,随后在循环工作载荷的作用下裂纹不断扩展,最终导致硬化层脱落,形成剥落坑。这一分析结果有利于促进齿轮制造企业提高齿轮生产质量,改进齿轮制动技术,最终延长风电齿轮箱的使用寿命。

2 实验方法

采用电火花线切割将1#、2#和3#轮齿样品从齿轮箱中速轴小齿轮上切割下来进行失效分析。从齿轮心部取样进行化学成分分析,分析仪器采用光电直读光谱仪,齿轮化学成分列于表1。化学成分检验结果表明,齿轮材质化学成分满足ISO 6336标准关于20CrNiMo的规定和要求,化学成分合格。

采用高级数码相机对失效齿轮进行宏观拍照,记录失效齿轮宏观特征。采用OLYMPUS GX71光学金相显微镜对齿轮的夹杂物和微观组织进行观察、记录和评级。采用SUPRA 35扫描电镜 (SEM) 观察和记录轮齿断口形貌。采用Alpha-step IQ表面轮廓仪分析齿面粗糙度,规定齿轮齿面粗糙度设计值小于0.6 μm,发生剥落的齿面粗糙度实测值为0.94 μm,说明齿面的粗糙度过大。齿轮表面经过渗碳淬火工艺处理,齿面和齿心硬度采用FRC-3e洛氏硬度计测试。检测结果表明,齿面洛氏硬度值为59.6 HRC,心部洛氏硬度值为34.3 HRC,齿轮的硬度满足标准要求。根据ISO 6336要求,齿轮硬度为58~64 HRC,心部硬度为33~45 HRC。采用AMH 43全自动显微硬度计对齿面节圆附近进行硬度梯度测试,根据ISO 2639,齿面淬硬层深度取决于齿面至显微硬度550 HV的位置,测试结果表明淬硬层深度约为3.2 mm,符合ISO 6336标准要求。

3 结果与讨论

3.1 宏观观察

对齿轮箱进行拆解以后,在现场对失效小齿轮的所有轮齿进行了仔细勘查,失效小齿轮如图1所示。现场外观检验发现个别轮齿齿面发生硬化层剥落,现场对失效轮齿进行了编号,分别标记为1#、2#、3#和4#。根据失效齿轮的宏观观察,1#轮齿上的剥落坑位于图1中轮齿的B端,3# 齿面裂纹位于图1中轮齿的B端。

3.2 断口观察与分析

在实验室中对失效轮齿进行了切割,将失效部位切割下来,随后进行了体视显微镜观察,1#轮齿齿

表1 被检小齿轮材质化学成分与ISO 6336标准要求值比较

Table 1 Chemical composition of the failed gear and the standard value from ISO 6336

(mass fraction / %)

Elements	C	Cr	Mn	Ni	Mo	Si	P	S	Fe
Gear material	0.18	1.55	0.68	1.42	0.28	0.24	0.006	0.004	Bal.
ISO 6336	0.17~0.23	0.35~0.70	0.65~0.95	0.4~0.7	0.15~0.25	0.40	0.025	0.035	Bal.

面剥落坑形貌如图2a所示，3#轮齿齿面裂纹形态如图2b所示。图2a中，可见明显的剥落坑，在剥落坑内断口呈现出"鱼鳞"状形貌。图2b中，可见明显的齿面裂纹，有的裂纹沿轮齿长度方向扩展，有的裂纹与轮齿长度方向呈现一定的角度。

对图2a中剥落坑进行放大观察，其形貌如图3所示。在整个大的剥落坑中可见两处明显的断裂台阶，如1#和2#黑色实线标识。据此整个剥落坑可以被分为3个主要区域，即A、B和C标识的区域。A区面积最大，其次是B区和C区。这说明A区开裂时间最早，扩展时间最长。图3中A区最下端，即靠近轮齿的根部可观察到贝壳状弧线，也称海滩花样，它是机械疲劳的关键证据。这说明剥落坑的产生是通过疲劳裂纹萌生和长大实现的。根据断口的特征判断，图3中箭头所指的位置分别是A、B和C区断口上的裂纹源区。从整个轮齿上看，裂纹源所在的在节线附近。A、B和C区断口上的裂纹源在同一直线上，因而可以称为线源。它们所在的线与加工痕迹是平行的。据此判断，裂纹最初萌生可能与加工刀痕有关。

从断口形貌上看，A区、B区和C区是相似的，所以随机选B区进行扫描电镜观察。图4为1#轮齿上

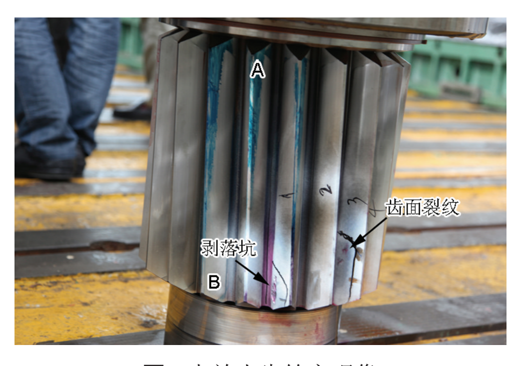


图1 失效小齿轮宏观像

Fig.1 Appearance of the failed gear at scene

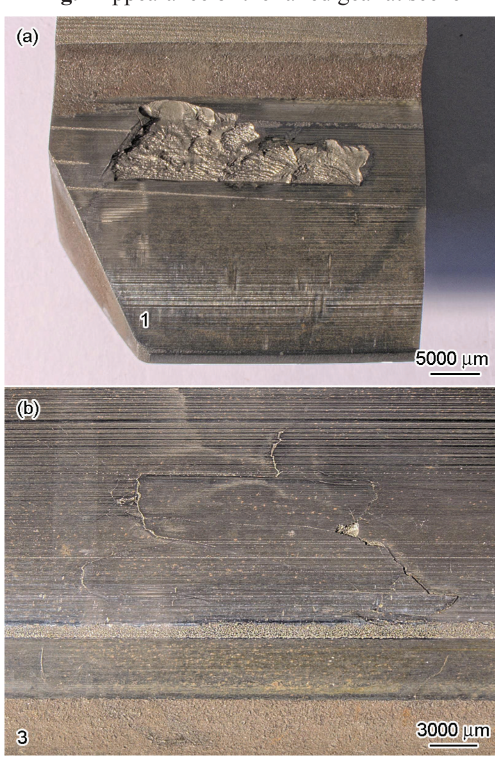


图2 1#轮齿表面剥落坑和3#轮齿表面齿面裂纹宏观形貌

Fig.2 Morphologies of the pits (a) and the cracks (b) on the tooth surface

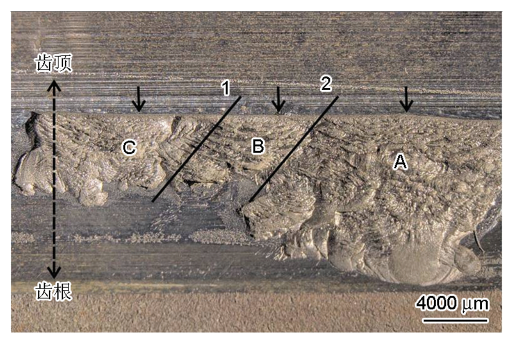


图3 采用体视显微镜观察1#失效轮齿齿面剥落坑形貌

Fig.3 Morphology of the pits on 1# tooth surface under the stereoscopic microscope

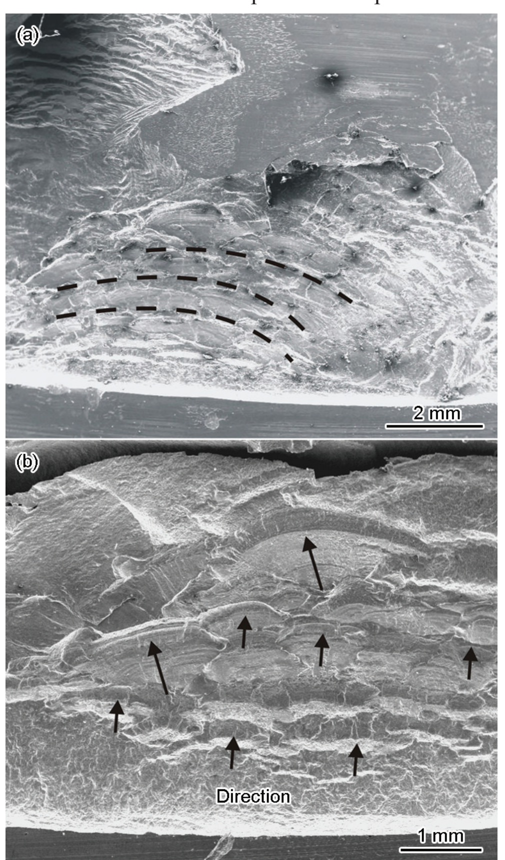
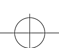


图4 1#失效轮齿齿面剥落坑局部高倍扫描电镜二次电子像

Fig.4 SEM images of the pits on 1# tooth surface at local position: (a) low magnification image, (b) high magnification image



剥落坑内B区(图3)的扫描电镜观察结果。图4a中，能观察到如“鱼鳞”状形貌特征，如图中黑色点划线所示，有一定的弧度，它的内侧指向裂纹源所在的位置，它的外侧指向裂纹扩展方向。

局部放大以后(图4b所示)，可以观察到箭头所指的疲劳弧线。疲劳弧线的内侧是裂纹源的方向，而疲劳弧线的外侧是裂纹扩展方向，所以裂纹的扩展方向如图中虚线箭头所指。很显然，裂纹萌生以后，对偶断口相互挤压或碰磨，使疲劳弧线变得有些模糊。然而，由于它们并未完全消失，所以疲劳弧线的存在很好地证明了裂纹的性质和扩展方式，即裂纹是疲劳裂纹，在工作载荷的作用下疲劳扩展。在齿轮工作过程中，主动齿轮和从动齿轮相互啮合。因此，齿面的受力较为复杂，除了压应力以外还有齿面相对滑动产生的切应力。根据受力情况分析，“鱼鳞”状断口并不是由单一裂纹扩展而成，而是当裂纹扩展一段以后，在裂纹的前缘由于应力集中，又萌生了许多新的疲劳裂纹，这些新的疲劳裂纹扩展与连接构成了主裂纹的扩展，于是大量的小疲劳断面构成了整体的“鱼鳞”状形貌特征。在这一过程中，相邻的小疲劳裂纹之间相遇时会形成断裂台阶，这一点在断口上得到了很好的印证。

图5为3#轮齿裂纹区打开断口前后的形貌。图5a中在4个特征点分别标注了A，B，C和D，与之相对应，在图5b中对应点也分别标注了A，B，C和D。结果表明，将裂纹部分表面硬化层除去以后，露出了硬化层下面的断口，在断口上观察到了很多小的贝壳状断面，如图中箭头所指，在贝壳状断面上可观察到明显的疲劳弧线，这说明3#轮齿上硬化层下的裂纹也是疲劳扩展的结果。根据疲劳弧线的方向判断，3#轮齿表面硬化层裂纹的裂纹源在A、B两点之间的直线段上，即裂纹由图上方向图下方扩展，即由节线附近向齿根扩展。这一观察结果还说明，3#轮齿表面裂纹也萌生于节线附近的直线段上，这一现象与1#轮齿表面剥落的萌生位置(裂纹源所在处)一致。从3#轮齿表面硬化层除去后露出的断口上看，它与1#剥落坑内的形貌非常相似。这一对比结果再次说明，虽然1#轮齿表面的剥落坑与3#轮齿表面的裂纹所在位置不同，但1#轮齿表面的剥落坑与3#轮齿表面的裂纹产生的原因以及机理是相同的。

采用3#轮齿工作裂纹源区齿面的SEM像如图6所示。根据图6a断口形貌可以看出，裂纹最早始于图中箭头位置，裂纹源应是线源，其位置比较光滑。由于齿轮进行了渗碳和风冷淬火，所以碳含量由齿面向心部逐渐下降。这样齿面的硬度会明显高于齿轮心部硬度。根据标准要求，齿面硬度为58~64 HRC，而齿轮心部硬度为33~45 HRC。因此，齿面淬硬层的变形能力远不如基体。齿面材质更脆，更耐磨，强度也更高，一般来说钢的强度越高，其韧性越差，断口脆性特征越明显。在图6b中可见齿面有很多相互平等的“沟痕”，其实这些相互平等的痕迹是加工刀痕，裂纹源所在直线平行于加工刀痕，说明加工刀痕对齿轮开裂有影响。

3.3 金相分析

在3#轮齿裂纹附近取金相样品进行夹杂物检验，检验结果表明夹杂物颗粒尺寸很小，根据GB 10561-2005对夹杂物进行评级，夹杂物小于0.5级，能够满足标准要求。根据技术资料，齿轮表面经过渗碳淬火，齿面向齿心组织变化的SEM像如图7a~d所示。齿面主要为细小的马氏体，碳化物颗粒细小而均匀。在接近齿轮的部位可见少量下贝氏体，随着向齿心深度的增加，下贝氏体逐渐增加，在齿轮心部主要为上贝氏体加少量的块状铁素体。

3.4 综合分析

在现场勘察发现，小齿轮有两根轮齿失效，两根轮齿之间相隔一个轮齿。轮齿现场勘察结果表明，

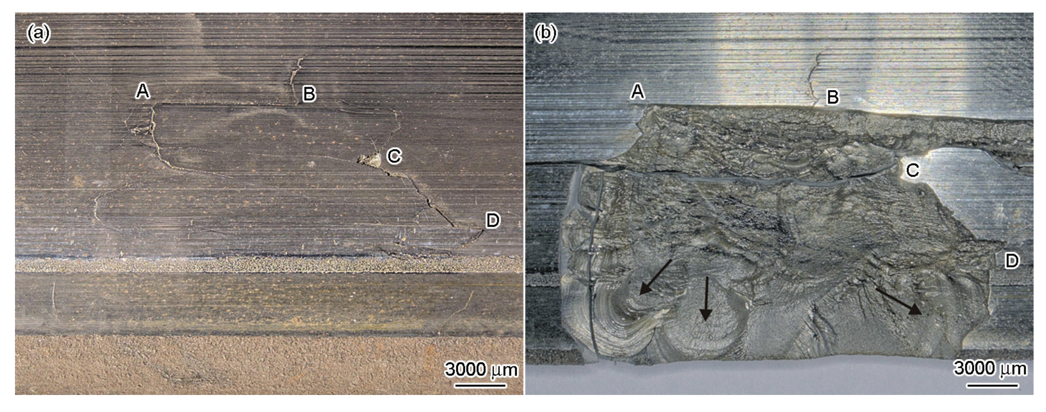


图5 采用体视显微镜观察3#失效轮齿齿面裂纹和裂纹断口形貌

Fig.5 Morphologies of the crack (a) and the fracture surface (b) under the hardened layer under the stereoscopic microscope

在1#齿轮齿面观察到了成片的剥落坑，而3#轮齿表面虽然未见剥落坑，但可见清晰的齿面裂纹。在实验室内，将3#轮齿裂纹处表面硬化层去除以后，观察了断口的特征，发现与1#轮齿相近，裂纹萌生的位置也在节线附近，裂纹萌生后，在交变载荷的作用下疲劳扩展，这些特征都与1#轮齿断口相似。然而，1#轮齿与3#轮齿不同点在于，1#轮齿表面淬硬层已经脱落，而3#轮齿表面淬硬层还未脱落。据此判断，1#轮齿失效的时间可能略早于3#轮齿。然而，断口对比观察结果表明，1#轮齿和3#轮齿的破坏机理是相同的[13]。

在光学金相显微镜下观察，材质夹杂物很小，它不足以引起材质的破坏。从齿面到心部，表层组织主要为淬火马氏体，碳化物细小而均匀，芯部组织为贝氏体加少量块状铁素体。齿轮表面和心部的硬度均能满足ISO 6336标准要求。淬硬层深度也满足要求，材质成分和组织检验未见异常。这说明，并不是材质本身的问题使得齿面强度不足，从而导致了开裂。

一般来说，导致齿面过早失效的原因可能来自3方面因素：材质问题、加工问题、工况载荷。上述检测结果表明，并非材质本身引起齿轮失效，齿轮表

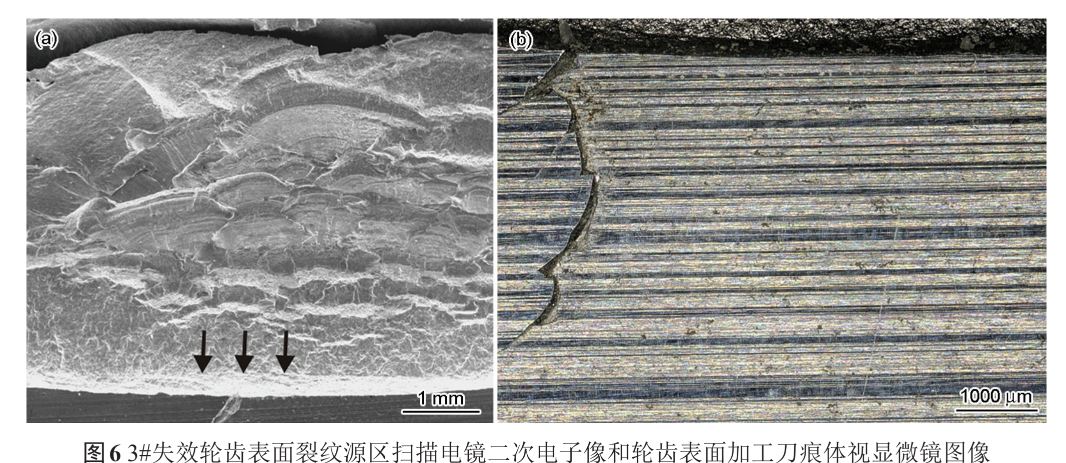


图6 3#失效轮齿表面裂纹源区扫描电镜二次电子像和轮齿表面加工刀痕体视显微镜图像

Fig.6 Morphologies of the crack source observed by SEM (a) and the tool marks observed by stereoscopic microscope (b) on the 3# tooth surface

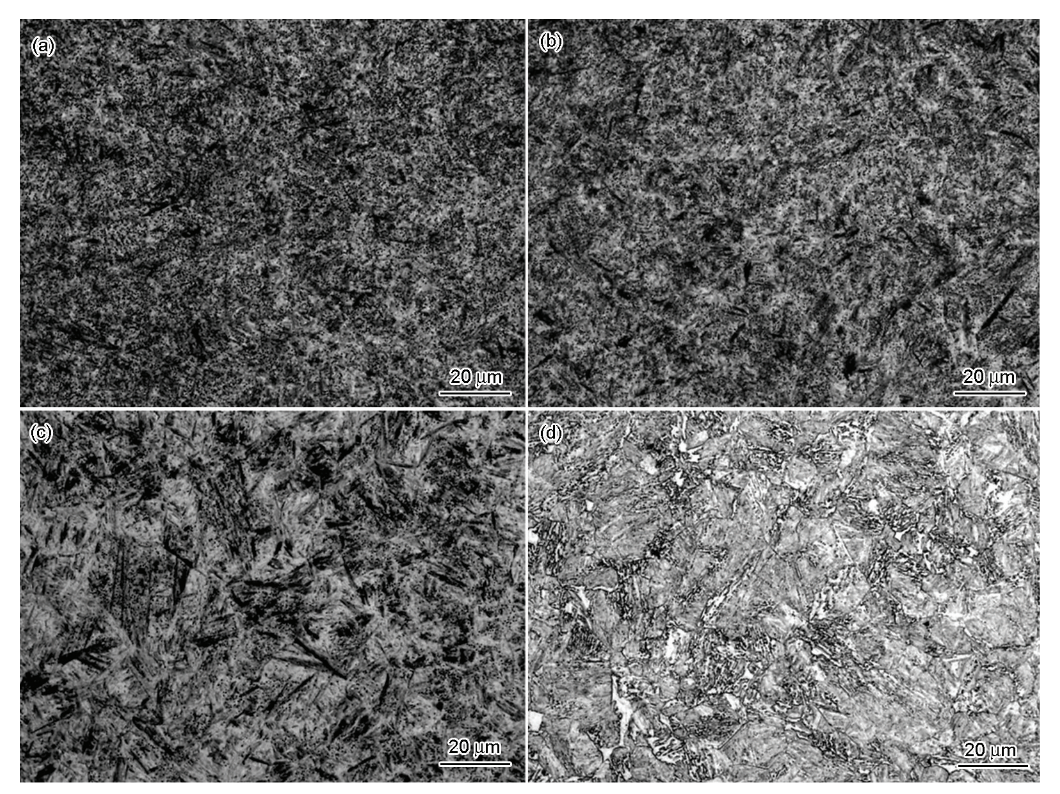
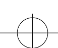


图7 齿轮材质的微观组织

Fig.7 Microstructures of the failed gear: (a) surface, (b) subsurface, (c) near center, (d) center



面剥落和开裂可能与齿面加工和载荷有关。通过断口观察和对裂纹源位置的分析,发现1#轮齿断口可以明显分为3个区,这3个区的裂纹源处于同一直线上,该直线在节圆附近,3#轮齿表面的裂纹也产生在节线附近的直线上。在3#轮齿表面裂纹附近测试齿面粗糙度,其值为0.92 μm,对于风电齿轮表面粗糙度的设计值通常为0.6 μm以下,标准规定通常为0.8 μm以下。体视镜显微观察发现轮齿表面可见明显的"沟状"痕迹,无疑这种沟状痕迹是加工刀痕。由于齿面经过渗碳风冷淬火,所以齿面硬度远高于齿轮心部,这种齿面具有缺口敏感性,当齿面突然承受较大的冲击载荷时,容易沿着加工刀痕产生裂纹。

风电齿轮箱内部是一个相对密闭的环境,基本不存在外来物撞击的可能性,只有啮合轮齿间的相互作用。在运行过程中,当风速超过一定值以后,需要对其进行制动,以免发生飞车,制动有两种方式,分别在高速轴端和低速轴端,当叶片的旋转速度超过某一值后,需要在高速端进行制动,这样中速轴小齿轮齿面会受到较大的冲击载荷作用。这也是本案例中齿面沿加工刀痕开裂的载荷来源。更准确地说,当齿轮箱在非正常制动的情况下,会产生瞬时过载,由于齿面加工刀痕较深,导致齿面在冲击载荷作用下沿加工刀痕开裂,随后在交变载荷驱动下萌生了疲劳裂纹,疲劳裂纹的扩展导致齿面硬化层脱落。

另据介绍,该风电机组所在的位置风况很复杂,风速和风向变化较快,这导致齿轮箱紧急制动成为可能,因而会造成瞬时过载。事实上,在风电机组选址时,需要对风车所在位置的风速进行长期监测,根据监测数据决定是否可以安装机组。然而,由于近来年风电发展速度较快,风况数据积累不充分,导致选址时仅能以当地的气象资料为依据,微观选址工作不细致,这也是造成风电机组频繁发生过载的原因之一。此外,由于大面积出现过载导致的齿轮失效问题,因而也需要通过设计继续改进制动技术,从根本上改变齿面受异常冲击载荷的现状。

综上所述,本文中风电齿轮箱中速轴小齿轮失效的原因是,加工刀痕较深导致齿面粗糙度较大,在异常制动载荷的作用下,导致了齿面沿着加工刀痕开裂,随后在交变载荷作用下,疲劳裂纹不断扩展,最终导致齿面硬化层脱落,形成剥落坑。根据上述分析结果,建议风电齿轮箱生产企业严格控制齿轮的加工质量。此外,需要改进齿轮箱的制动技术,避免制动造成的瞬时过载给齿面带来冲击,造成硬化层碎裂。

4 结论

(1) 某1.5 MW风电机组齿轮箱中速轴小齿轮发生齿面开裂和剥落,打开齿面裂纹并与剥落坑形貌进行对比观察与分析,分析结果表明3#齿面裂纹和1#齿面剥落坑产生的原因是相同的,裂纹均萌生于节线附近,裂纹源为线源,裂纹的扩展是交变载荷作用的结果。

(2) 检验发现,轮齿表面加工刀痕较深,粗糙度不合格,受到异常载荷作用,齿面沿加工刀痕开裂,随后萌生疲劳裂纹,导致齿面硬化层脱落形成点蚀坑。

参考文献

[1] 方创琳. 中国风电发展目标分析与展望 [J]. 中国能源, 2007, 29(12): 30

[2] 朱柯丁, 宋艺航, 谭忠富等. 中国风电并网现状及风电节能减排效益分析 [J]. 中国电力, 2011, 44(6): 67

[3] 张运洲, 白建华, 辛颂旭. 我国风电开发及消纳相关重大问题研究 [J]. 能源技术经济, 2010, 22(1): 1

[4] 辛卫东, 马志勇, 滕伟等. 振动监测技术在风电机组齿轮箱故障诊断中的应用 [J]. 中国电力, 2012, 45(5): 77

[5]于良峰, 赵登利, 吴树梁. 风电机组齿轮箱故障分析及改进措施 [J]. 风能, 2012, (10): 86

[6] 傅质馨, 袁越. 海上风电机组状态监控技术研究现状与展望 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 121

[7] Osman A. Fatigue failure of a helical gear in a gearbox [J]. Eng. Failure Anal., 2006, 13: 1116

[8] Jiang Q Y, Barber G C. Modeling of reaction film failure in gear lubrication [J]. Wear, 1999, 231: 71

[9] Boniardi M, Errico F D, Tagliabue C. Influence of carburizing and nitriding on failure of gears- A case study [J]. Eng. Failure Anal., 2006, 13: 312

[10] Jonck J, Slabbert G A. Analysis of a failed spur gear from a vibrohammer [J]. Eng. Failure Anal., 2013, 34: 511

[11] 王占彬, 赵文侠, 李莹. 输入齿轮断裂原因分析 [J]. 失效分析与预防, 2013, 8(6): 366

[12] 王大伟, 崔博, 王明军. 某风电场1.5 MW风电机组齿轮箱点蚀及断齿故障分析 [J]. 风能, 2014, (5): 92

[13] 齿轮手册编委会. 齿轮手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011